



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402443

引用格式:徐郡彬,宋建平,黄小林,等.利用激光与影像融合优化区域古建筑模型的方法[J].科学技术与工程,2025,25(1):37-43.

Xu Junbin, Song Jianping, Huang Xiaolin, et al. Method of optimizing regional ancient architectural models using laser and image fusion[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(1): 37-43.

天文学、地球科学

利用激光与影像融合优化区域古建筑模型的方法

徐郡彬¹, 宋建平², 黄小林¹, 孙保燕^{1*}, 黎志明¹

(1. 桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 桂林 541004; 2. 广西交投集团有限公司, 南宁 530000)

摘要 针对单一影像建模技术构建区域古建筑实景三维模型无法满足文物保护精度要求的难题,提出一种激光与影像融合优化区域古建筑实景三维模型的建模方法。首先以无人机环绕交叉航摄与近景摄影结合获取目标区域影像建模数据,通过三维激光扫描仪获取无人机航摄盲区激光扫描数据;其次将激光扫描数据与影像数据融合配准得到目标区域完整点云模型,进而以此重建得到区域精细化实景三维模型;最后通过异源数据融合误差分析,并与单一影像建模成果进行精度和纹理完整度对比分析验证所提方法的优越性。结果表明:异源数据拟合精度高,该方法所构建的区域古建筑实景三维模型精度高、纹理完整性好,为实现目标范围内古建筑群精细化建模提供了技术参考,在完善古筑三维数字模型储存档案库方面具有广泛的应用前景。

关键词 三维激光扫描; 环绕航摄; 近景摄影; 数据融合

中图法分类号 P208;

文献标志码 A

Method of Optimizing Regional Ancient Architectural Models Using Laser and Image Fusion

XU Jun-bin¹, SONG Jian-ping², HUANG Xiao-lin¹, SUN Bao-yan^{1*}, LI Zhi-ming¹

(1. College of Architecture and Traffic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangxi Communications Construction Group Limited Company, Nanning 530000, China)

[Abstract] Addressing the challenge of insufficient accuracy in building regional cultural heritage 3D models using single-image modeling techniques, a method for optimizing regional ancient architectural three-dimensional models through the fusion of laser and imagery was proposed. Initially, imagery data of the target area was acquired through drone-based cross-flight aerial photography combined with close-range photography. Subsequently, laser scanning data was obtained using a 3D laser scanner to cover blind spots from drone aerial photography. Then, the laser scanning data was fused and registered with the imagery data to generate a complete point cloud model of the target area, which is then used to reconstruct a refined 3D model of the regional cultural heritage. Finally, the superiority of the proposed method was validated through error analysis of the fused heterogeneous data and comparative analysis of accuracy and texture completeness with single-image modeling results. The results indicate that the fused heterogeneous data achieves high fitting accuracy, and the resulting regional ancient architectural 3D model exhibits high accuracy and texture completeness, thereby providing valuable technical reference for the detailed modeling of ancient architectural complexes within the target scope and holding broad application prospects in enhancing the digital archive storage of ancient architectural three-dimensional models.

[Keywords] 3D laser scanning; aerial circular photography; close-range photography; data fusion

历史建筑是物质文化遗产的重要组成部分,承载着中华民族悠久深厚的文化传统,具有重要的历史价值^[1-2]。文物保护与传承已纳入“十四五”城镇化与城市发展科技创新专项规划,利用前沿科技建立

文物电子信息储存档案已成为古建筑保护研究的重要推动因素之一^[3-4]。位于广西桂林市的靖江王陵三代墓——庄简王陵,具有极高的历史研究价值和艺术价值。但受到当地降雨量多、气候潮湿等因素的影

收稿日期: 2024-04-06 修订日期: 2024-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(12162010); 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA19182023); 广西科学研究与技术开发计划(桂科攻1598019-8)

第一作者: 徐郡彬(1996—),男,汉族,广东梅州人,硕士研究生。研究方向:数字建造与BIM技术应用。E-mail: JansonXS@163.com。

*通信作者: 孙保燕(1962—),男,汉族,河南驻马店人,教授级高级工程师。研究方向:非接触测绘、数字建造与BIM应用、文物数字化保护。E-mail: sunbaoyan@126.com。

响,该历史建筑物群受到不同程度的损坏,因此,建立该区域古建筑群精细化实景三维模型,以电子信息档案的方式储存保护这些历史建筑群刻不容缓。

目前,国内外学者在构建区域精细化实景三维模型领域进行了大量研究。Che 等^[5]利用倾斜摄影技术结合边缘恢复算法实现了实景三维模型边界优化,但对于优化区域内个别建筑效果不明显;He 等^[6]通过优化航摄参数,融合高低空影像数据构建桥梁的精细化实景三维模型,但因受限于拍摄盲区难以得到完整度较高的模型;Kanun 等^[7]利用无人机摄影测量技术实现古建筑的实景三维模型构建,但该方法用于区域建模时效率较低;也有学者利用无人机航摄技术结合的影像建模方法得到桥梁及边坡危岩的精细化实景三维模型,以此实现了拱桥的表观病害检测及边坡危岩的阶段性监测,但受限于无人机拍摄角度而无法得到完整的建模影像,导致建模完整度不高^[8-10];晏军等^[11]利用倾斜摄影结合近景摄影技术重建得到丘陵地貌的高精度实景三维模型,但该方法得到的模型细节表达较差。故仅依靠现有的影像建模方法构建区域古建筑实景三维模型得到的成果难以满足文物保护三维数字模型储存档案建设的质量需求。文物保护的重点在于区域实景三维模型中的每一个古建筑的纹理细节及艺术构造。为解决现有建模技术在古建筑建模领域存在的技术难题,现以庄简王陵为研究对象,聚焦文物保护重点建筑,提出结合环绕交叉航摄、近景摄影及三维激光扫描技术构建区域古建筑群的实景三维模型,并与单一影像数据建模成果进行精度及模型效果对比,验证所提方法的优越性。

1 激光与影像融合建模关键技术

融合建模技术包括环绕交叉航摄、近景摄影与三维激光扫描。利用无人机环绕交叉航摄与近景摄影结合采集目标区域主体建模数据,但因无人机角度限制,存在局部影像缺失的情况,而辅以三维激光扫描技术可获得影像拍摄盲区的激光点云数据,从而得到目标区域完整建模数据,通过激光与影像数据融合建模的方式,以提高区域实景三维模型的精度及纹理完整度。

1.1 激光与影像融合建模关键技术

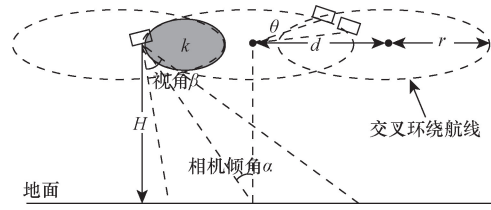
拱桥桥体上部数据采集方式分为区域环绕航摄和细节近景摄影,区域环绕航摄以获取拱桥主体及周围环境的影像数据,近景摄影以获取拱桥立面和细节节点的纹理数据。

环绕交叉航摄^[12]是无人机倾斜摄影技术中的一种高效航拍方式,该方式控制无人机在多环交叉

重叠的航线中对准目标物体进行空中影像数据采集,无人机镜头始终聚焦在环绕圆航线的圆心区域,如图 1 所示。环绕航摄涉及的 5 个主要参数 H 、 α 、 N 、 r 、 k 的关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} H = \frac{f}{a} \text{GSD} \\ \theta = \frac{2\pi}{N} \\ r = H \tan \alpha \\ k = \frac{d}{2r} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: f 为镜头焦距; a 为像元尺寸; GSD 为影像分辨率; N 为环绕方向数。



H 为航高; α 为航摄倾斜角; r 为环绕圆半径; k 为相邻环重叠率; d 为相邻两圆环的圆心距离; β 为竖直面偏转角度; θ 为环内拍摄点间隔角度

图 1 多环交叉航摄示意图

Fig. 1 Diagram of multi-ring cross-sectional aerial surveys

1.2 三维激光扫描

三维激光扫描是一种用于捕获目标物体或场景几何激光点云信息的三维建模技术,其具备无接触性、高精度、高灵活性等优势^[13]。架站式三维激光扫描仪主要通过水平角与高度角偏转控制器来控制反射棱镜的实际转动,将激光发射器的激光点有序扫过目标区域,利用激光往返的空间相位差计算出远点到目标表面点的距离 L ,再根据内置扫描模块得到每个激光点水平面偏转角度 θ 和竖直面偏转角度 β ,运用式(2)可计算目标表面点三维坐标,从而得到目标表面的三维信息,三维激光点坐标的计算原理如图 2 所示。

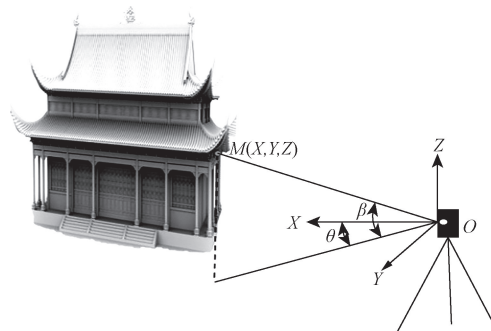


图 2 激光点云坐标计算原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser point cloud coordinate calculation principles

$$\begin{cases} X = L\cos\beta\cos\theta \\ Y = L\cos\beta\sin\theta \\ Z = L\sin\beta \end{cases} \quad (2)$$

1.3 激光点云与影像点云融合

无人机影像点云与三维激光点云使用的坐标系不同,均需通过坐标旋转和平移实现坐标系统一,坐标转换如式(3)所示,完成坐标系统一后的异源点云基本完成了粗配准,但为提升异源点云的融合精度,仍需经过迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法^[14]进行二次精确配准优化,以获得激光点云与影像点云的高精度融合完整点云。

式(3)中: φ, δ, η 为坐标旋转参数; a, b, c 为坐标平移参数; (X_j, Y_j, Z_j) 为配准后点云坐标; (x_j, y_j, z_j) 为点云原始坐标。

2 数据采集与处理

2.1 实地勘察

研究区域选择广西桂林市靖江王陵中的庄简王陵,该王陵主要由左右朝房、拱陵门、拱玉带石桥、楼恩门、棱恩殿、12对石作仪仗组成。现用交叉环绕航摄与三维激光扫描技术结合重建王陵的精细化实景三维模型,以三维数字档案的方式对王陵进行保护,采用的实验设备为 FARO Focus Premium 150 和 DJI Phantom4 pro V2.0,其主要技术指标如表1和表2所示,激光与影像数据融合技术流程如图3所示。

2.2 外业数据采集

庄简王陵的建模区域面积为 23 547 m²,外业开始前在每个古建筑上确定 4 个检测点,共 20 个检测点,并在区域的前、中、后位置各设置一个控制点,控制点上放置 20 cm × 20 cm 棋盘标靶,再用全站仪测得各个点的坐标信息。在实验中先使用无人机交叉环绕航摄进行目标区域上部影像数据采集,设定航摄高度为 50 m,环半径为 20 m,环绕重叠率为 60%,根据式(1)计算出航摄倾斜角度为 20°,相邻环圆心距离为 24 m,在航线规划软件中进行参数设置后自动采集获得影像 288 张;然后对每个古建筑进行立面近景摄影数据采集,获得影像 1 450 张,为保证近景影像与环绕交叉影像的重叠度,避免模型

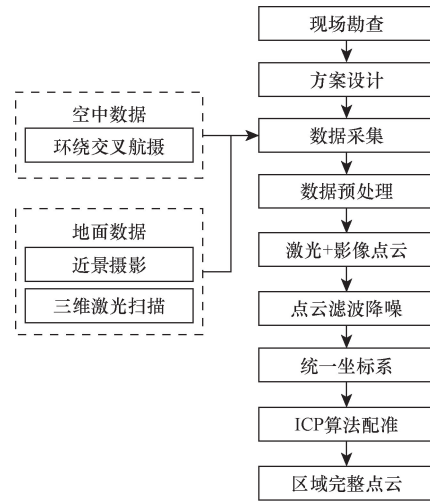


图3 技术流程图

Fig. 3 Image technical workflow diagram

表1 FARO Focus Premium 150 主要技术指标

Table 1 Key technical specifications of FARO Focus Premium 150

技术指标	参数
扫描范围/m	0.5 ~ 150
垂直扫描视场角/(°)	300
水平扫描视场角/(°)	360
测距误差/mm	976 000
扫描速度/(点·s ⁻¹)	±1
垂直分辨率/(°)	0.009
水平分辨率/(°)	0.009

表2 DJI Phantom4 pro V2.0 主要技术指标

Table 2 Key technical specifications of DJI Phantom4 pro V2.0

技术指标	参数
云台倾斜角度/(°)	-90 ~ +30
镜头 FOV/(°)	84
感光度/ISO	100 ~ 3 200
影像分辨率/(pixel × pixel)	4 864 × 3 648
像元物理尺寸/μm	2.7

出现分层现象,以影像重叠率为约束在控制点标靶上方设置过渡影像,获得该区域过渡影像 12 张。三维激光扫描仪站点布设要满足的重叠度一般为 30% ~ 40%,综合实际环境与仪器自身精度,设定扫描仪分辨率为 1/2,质量为 4 叉形,在现场布设三维激光扫描站点 26 个,如图 4 所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = \mathbf{M}(\varphi, \delta, \xi) \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}(\varphi, \delta, \eta) = \begin{bmatrix} \cos\delta\cos\eta & \cos\delta\sin\eta & -\sin\delta \\ -\cos\varphi\sin\eta + \sin\varphi\sin\delta\cos\eta & \cos\varphi\cos\eta + \sin\varphi\sin\delta\sin\eta & \sin\varphi\cos\delta \\ \sin\varphi\sin\eta + \cos\varphi\sin\delta\cos\eta & -\sin\varphi\cos\eta + \cos\varphi\sin\delta\sin\eta & \cos\varphi\cos\delta \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

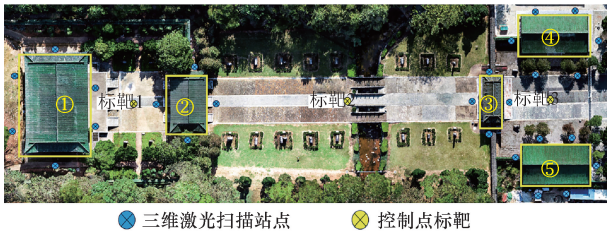


图4 三维激光扫描站点布设图

Fig. 4 Layout diagram of 3D laser scanning stations

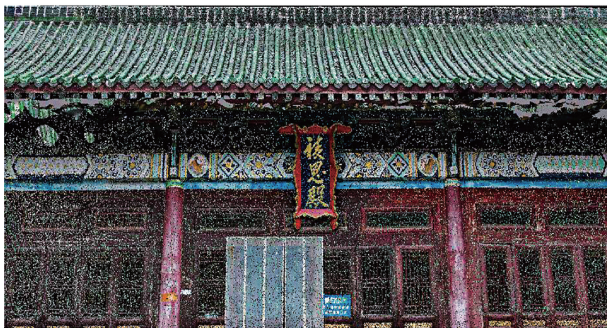
2.3 数据处理

通过无人机交叉摆动航摄及近景摄影共获得影像 1 750 张,删除模糊、冗余等无效影像 25 张,最终获得有效影像 1 725 张,经过空中三角测量计算后生成影像密集点云,接着将三维激光扫描仪获得 26 站激光点云原始文件以每个古建筑为单位分批导入 SCENE 中进行手动拼接处理,进而得到 5 组古建筑的下部激光点云,然后对激光点云和影像点云进行高斯滤波降噪^[15],降噪后的局部点云如图 5 所示。

因无人机影像与三维激光点云使用的坐标系不同,需通过坐标旋转和平移实现坐标统一,坐标统一后的点云数据利用 ICP 算法进行精准匹配融合,融合后区域古建筑点云如图 6 所示,最后将获得的区域整体点云导入 CC(context capture)软件,赋予控制点精准坐标信息后构建不规则三角网、三维白膜封装、自动纹理映射生成区域精细化实景三维模型,如图 7 所示。



(a)降噪后激光点云局部图



(b)降噪后影像点云局部图

图5 降噪后点云图

Fig. 5 Point cloud image after noise reduction

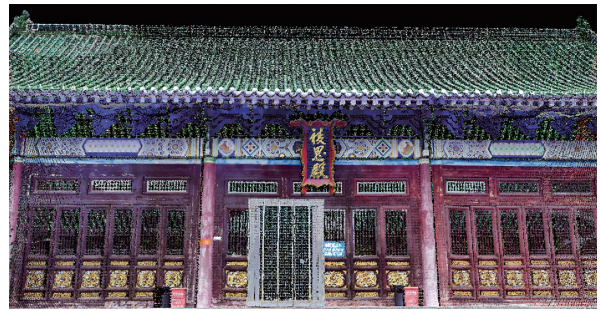


图6 古建筑融合后点云图

Fig. 6 Point cloud image after fusion



图7 区域精细化实景三维模型

Fig. 7 Regional refined realistic 3D model image

3 实验结果对比分析

3.1 数据融合偏差分析

为验证数据融合精度及该建模方法的可靠性,随机选取激光与影像点云融合公共接边处的 20 个点对进行拟合偏差分析评估,以区域影像点云 A 选取的随机点为圆心,扩大搜索半径 R 直到在古建筑点云 B 中找到距离为 S 的最近参考点,再通过式(4)计算出点对之间的垂直分量 ΔL ,以最近的垂直分量作为数据的接缝偏差^[16],偏差统计结果如表 3 所示。

$$\Delta L = \sqrt{S^2 - R^2} \quad (4)$$

式(4)中: ΔL 为选中的检测点对间的垂直分量; S 为点云 A 中选中点至 B 中对应点的距离; R 为搜索半径。

表3 异源数据融合偏差统计表

Table 3 Heterogeneous data fusion bias statistics table

点号	R	S	ΔL	点号	R	S	ΔL
1	0.89	1.21	0.82	11	0.28	0.33	0.17
2	0.35	0.62	0.51	12	0.59	1.13	0.96
3	0.25	0.35	0.24	13	1.02	1.39	0.94
4	1.01	1.12	0.48	14	0.48	0.87	0.73
5	0.23	0.52	0.47	15	0.74	1.22	0.97
6	0.29	0.44	0.33	16	0.65	0.93	0.67
7	0.57	1.23	1.09	17	1.15	1.97	1.60
8	0.62	0.96	0.73	18	0.18	0.52	0.49
9	0.42	0.87	0.76	19	0.26	0.58	0.52
10	0.31	0.61	0.53	20	0.91	1.23	0.83

由表 3 数据可知,数据融合平均偏差为 0.69 mm,90%的偏差小于 1 mm,点云数据的融合精度高,该数据融合建模方法具备可行性。

3.2 模型精度对比分析

为确定激光与影像融合建模精度高于单一影像数据建模,需对两种建模方法得到的区域古建筑实景三维模型进行精度对比分析。确定区域古建筑实景三维模型 20 个检测点位置,并在两个不同方法重建的模型中量测出 20 个检测点坐标,以全站仪实测坐标作为真值,融合建模与单一影像建模成果的误差统计结果如图 8 所示^[17],用式(5)计算得到模型平面精度 ξ_V 和高程精度 ξ_Z 如表 4 所示。

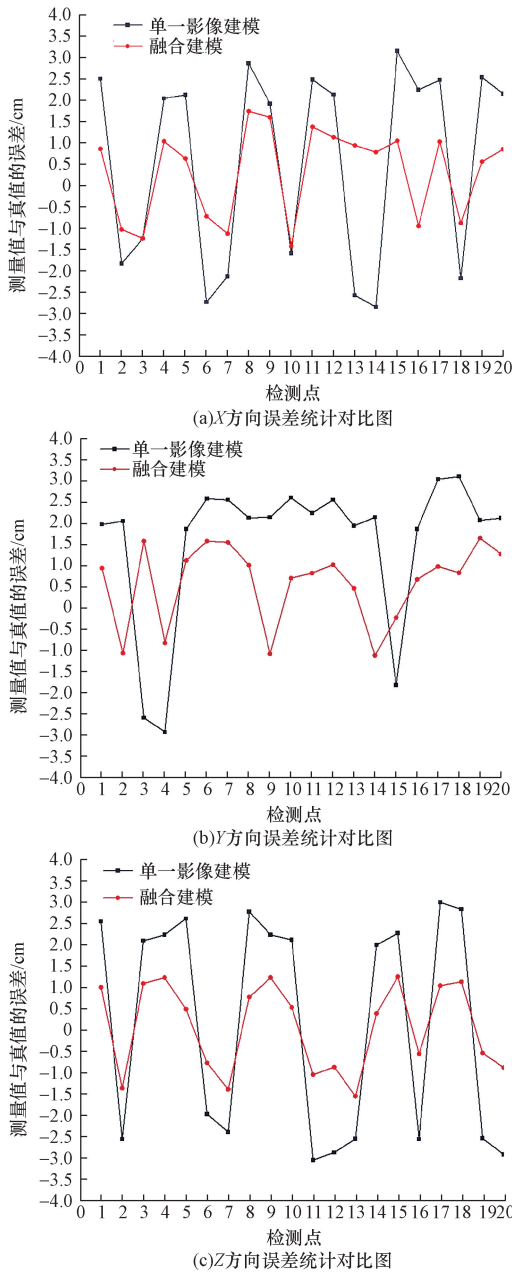


图 8 模型点位误差统计图

Fig. 8 Statistical graph of model point positioning errors

表 4 绝对精度统计表

Table 4 Absolute precision statistics table

建模方式	平面精度	高程精度
	ϵ_s/cm	ϵ_h/cm
单一影像建模	3.30	2.51
融合建模	1.52	0.96

$$\left\{ \begin{aligned} \xi_X &= \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^2}{n}} \\ \xi_Y &= \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta Y_i^2}{n}} \\ \xi_Z &= \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta Z_i^2}{n}} \\ \xi_V &= \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2)}{n}} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

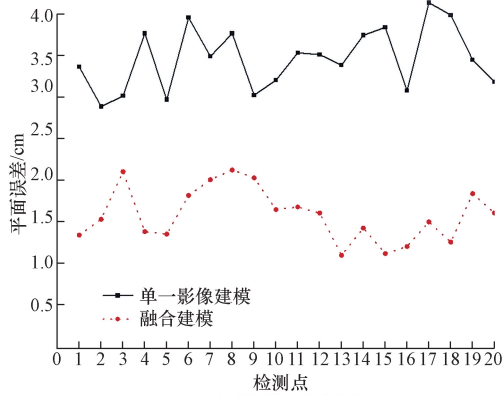
式(5)中: ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 为检查点与实测坐标在 XYZ3 个方向上的差值; n 为检查点个数。

由表 4 数据可知,单一影像建模成果在 X、Y、Z 方向上的中误差分别为 ± 2.34 、 ± 2.32 、 ± 2.51 cm,而融合建模成果在 X、Y、Z 方向上的中误差分别为 ± 0.85 、 ± 0.88 、 ± 0.96 cm,满足 I 级历史建筑数字化测量误差小于 2 cm 要求^[18],其中各检测点的平面误差和高程误差对比分析如图 9 所示。融合建模结果的平面精度及高程精度相对于单一影像建模结果分别提升 53.9%、61.8%,综上所述,通过激光和影像融合构建的区域古建筑实景三维模型,其精度得到了较大提升。

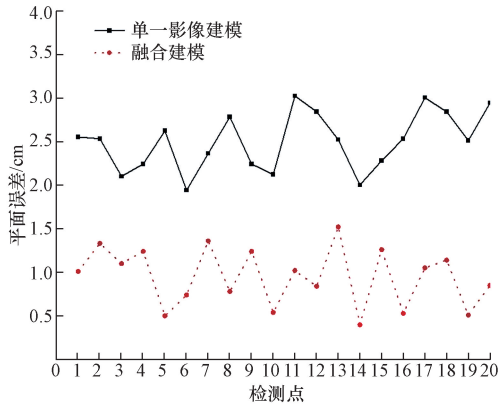
3.3 模型效果对比分析

单一影像建模受到环境和无人机设备等多因素限制,导致重建的区域古建筑实景三维模型存在空洞、扭曲等缺陷,如图 10(a)、图 10(c) 所示。运用激光和影像融合重建区域古建筑实景三维模型中使古建筑纹理质量得到较大的改善,如图 10(b)、图 10(d) 所示。

模型的纹理完整度可通过量化指标来表示,将模型中没有空洞、扭曲的部分定义为“完整”,以“完好率”表示,即“完整”部分在单位面的占比^[19]。以目标区域内古建筑模型 5 个面(左、右、前、后、上)为单位面,将每一个单位面均匀划分单元格,如图 11 所示,估算不同建模方法建模成果中古建筑每个面单元格“完整”部分的总面积,取 5 个面所求总面积的平均值,从而得到单一影像建模成果完好率为 0.75,融合技术构建的模型完好率为 0.91。



(a)平面误差对比分析图



(b)高程误差对比分析图

图9 检测点相对精度对比分析图

Fig. 9 Detection point relative accuracy comparative analysis graph

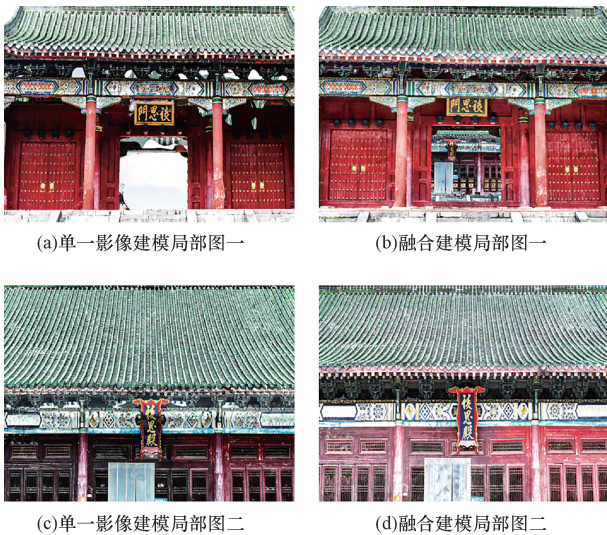


图10 建模成果对比图

Fig. 10 Modeling results comparison graph

4 结论

以桂林庄简王陵为实验对象,利用激光与影像数据融合优化区域古建筑实景三维模型,经过实验数据对比分析,得到具体研究成果如下。



图11 单位面均匀单元网格划分图

Fig. 11 Diagram illustrating the division of a uniform unit grid per unit area

(1)激光与影像数据融合精度高,利用三维激光扫描与交叉环绕航摄、近景摄影测量多技术结合能实现技术的优势互补,解决传统单一影像建模出现的空洞、扭曲等模型质量问题。

(2)从精度对比分析来看,融合建模相较于单一影像建模结果的平面精度提升 53.9%,高程精度提升 61.8%。

(3)融合激光与影像得到的实景三维模型纹理质量得到较大提升,相较于单一影像建模结果而言,模型完整度提升 21.3%,古建筑的细部纹理也更加细腻、真实。

综上所述,利用所提出的激光与影像融合建模方法建立区域古建筑实景三维模型,有效地实现了建筑模型优化,解决了部分现有建模方法用于区域古建筑建模遇到的模型空洞、扭曲等质量缺陷,使模型质量得到较大提升。该建模方法为建立区域古建筑精细化实景三维模型提供了可靠的研究思路,在提升历史建筑三维数字信息储存档案库质量方面具有较高的项目应用价值。

参 考 文 献

- [1] 刘秀伟,任璞,孙晓敏,等. 中国古建筑三维数字化方法综述[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2023, 46(3): 592-603.
Liu Xiuwei, Ren Pu, Sun Xiaomin, et al. Overview of three-dimensional digitization methods for Chinese ancient architecture[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2023, 46(3): 592-603.
- [2] 孙权,何颖,刘大平. 历史建筑数字化修复监测技术研究[J]. 建筑学报, 2022(S1): 136-142.
Sun Quan, He Ying, Liu Daping. Research on digital restoration and monitoring technology of historical architecture[J]. Architectural Journal, 2022(S1): 136-142.
- [3] 刘鹏程,曹骞,匡志威,等. 古建筑多源数据三维建模方法[J]. 测绘通报, 2022(S2): 316-321.
Liu Pengcheng, Cao Qian, Kuang Zhiwei, et al. Three-dimensional modeling method of ancient architecture based on multi-source data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(S2): 316-321.

- [4] 刘秀伟,任璞,孙晓敏,等. 中国古建筑三维数字化方法综述[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2023, 46(3): 592-603.
Liu Xiuwei, Ren Pu, Sun Xiaomin, et al. Overview of three-dimensional digitization methods of Chinese ancient architecture[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2023, 46(3): 592-603.
- [5] Che D, He K, Qiu K, et al. Edge restoration of a 3D building model based on oblique photography[J]. Applied Sciences, 2022, 12(24): 12911.
- [6] He S, Guo X, He J, et al. Investigation of measurement accuracy of bridge deformation using UAV-based oblique photography technique[J]. Sensors, 2022, 22(18): 6822.
- [7] Kanun E, Alptekin A, Karataş L, et al. The use of UAV photogrammetry in modeling ancient structures: a case study of “Kanytelis”[J]. Advanced UAV, 2022, 2(2): 41-50.
- [8] 孙保燕,莫春华,张玉涛,等. 贴近和倾斜摄影互融在拱桥表观病害检测的应用[J]. 遥感信息, 2023, 38(2): 26-32.
Sun Baoyan, Mo Chunhua, Zhang Yutao, et al. Application of close-range and oblique photography fusion in the detection of apparent diseases on arch bridges[J]. Remote Sensing Information, 2023, 38(2): 26-32.
- [9] 张玉涛,王仕富,孙保燕,等. 面向边坡危岩的旋翼机环绕航摄影处理与分析[J]. 遥感信息, 2023, 38(2): 119-126.
Zhang Yutao, Wang Shifu, Sun Baoyan, et al. Processing and analysis of rotary-wing UAV surrounding aerial photography for rockfall hazardous slopes[J]. Remote Sensing Information, 2023, 38(2): 119-126.
- [10] 吴凌霄,段祝庚,江学良. 无人机倾斜摄影测量构建悬索桥三维模型与病害检测——以邵阳市桂花大桥为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(8): 3153-3161.
Wu Lingxiao, Duan Zhugeng, Jiang Xueliang. Construction of three-dimensional model and disease detection of suspension bridge by UAV oblique photography measurement: taking Guihua Bridge in Shaoyang City as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(8): 3153-3161.
- [11] 晏军,杨银波,何元甲,等. 无人机摄影测量三维建模与地形测量精度分析[J]. 测绘通报, 2023(S1): 54-58.
Yan Jun, Yang Yinbo, He Yuanjia, et al. Precision analysis of UAV photogrammetry 3D modeling and terrain measurement[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(S1): 54-58.
- [12] 孙保燕,韦龙华,周鑫,等. 倾斜摄影三维建模的环绕航摄影参数优化[J]. 桂林理工大学学报, 2024, 44(1): 103-108.
Sun Baoyan, Wei Longhua, Zhou Xin, et al. Optimization of surrounding aerial photography parameters for 3D modeling of tilted photography[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2024, 44(1): 103-108.
- [13] Moyano J, Justo-Estebanz A, Nieto-Julián J E, et al. Evaluation of records using terrestrial laser scanner in architectural heritage for information modeling in HBIM construction: the case study of the La Anunciación church (Seville)[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 62: 105190.
- [14] Yue X, Liu Z, Zhu J, et al. Coarse-fine point cloud registration based on local point-pair features and the iterative closest point algorithm[J]. Applied Intelligence, 2022, 52(11): 12569-12583.
- [15] 李勇兵,高成明,马盈盈,等. 三维激光扫描技术在隧道变形监测及检测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(12): 5111-5117.
Li Yongbing, Gao Chengming, Ma Yingying, et al. Application of three-dimensional laser scanning technology in deformation monitoring and detection of tunnels[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(12): 5111-5117.
- [16] 孙保燕,周鑫,覃禹程,等. 空地大数据互辅融合技术在大型牌式古建筑重建的应用[J]. 测绘通报, 2022(1): 121-127, 132.
Sun Baoyan, Zhou Xin, Qin Yucheng, et al. Application of multi-source data fusion technology in the reconstruction of large-scale card-style ancient buildings[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(1): 121-127, 132.
- [17] 鲍国,张书毕,陈强,等. 基于地面LiDAR的建筑物精细化三维重建及精度分析[J]. 金属矿山, 2023(9): 140-144.
Bao Guo, Zhang Shubi, Chen Qiang, et al. Fine 3D reconstruction and accuracy analysis of buildings based on ground LiDAR[J]. Metal Mine, 2023(9): 140-144.
- [18] 佚名. 《历史建筑数字化技术标准》十月实施[J]. 建设科技, 2021(14): 9.
Anonymous. Implementation of *Digital Technology Standards for Historical Buildings* in October [J]. Construction Technology, 2021(14): 9.
- [19] 张玉涛,孙保燕,莫春华,等. 无人机与三维激光扫描融合的拱桥三维重建[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(6): 2274-2281.
Zhang Yutao, Sun Baoyan, Mo Chunhua, et al. Three-dimensional reconstruction of arch bridge with fusion of UAV and 3D laser scanning[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(6): 2274-2281.